

I-25 建物の3Dモデル自動生成のための多重建物ポリゴン処理

Multiple Building Polygon Processing for Automatic Generation of 3-D Building Models

杉原 健一¹・周 欣欣²・村瀬 孝宏³

Kenichi SUGIHARA, Xinxin ZHOU, Takahiro MURASE

抄録: 都市の3Dモデルは、都市計画、まちづくり、防災、景観などのアカデミックな分野から公共事業の情報公開、まちづくりへの住民参加の場、観光案内、企業の広告、営業活動の場としてまで利活用が期待される重要な「情報基盤」である。これまでの研究成果で、都市の3Dモデルの「自動生成システム」が、電子地図上の頂角が直角の建物境界線を「長方形の集まり」にまで、分割・分離し、各長方形の上に建物の3Dモデルを自動生成した。現実の高層ビルには、建物の高さ方向に、階毎に同じ形状を繰り返す建物だけでなく、高さ方向に、階別に異なる形状をとる、複雑な形態となる高層ビルも数多く存在する。本研究では、こうした階別に異なる形態となる建物の3Dモデルを、階ごとに異なる形状となる「階ごとの境界線」を内部に持つ電子地図上の「多重建物ポリゴン(建物境界線)」に基づいて、自動生成するシステムを提案する。

Abstract: A 3D city model is an important information infrastructure that can be utilized in several fields. However, enormous time and labor has to be consumed to create these 3D models, using 3D modeling software such as 3ds Max or SketchUp. In order to automate the laborious steps, we propose a GIS and CG integrated system that automatically generates 3D building models, based on building polygons (building footprints) on a digital map. There are some buildings whose floors take various shapes according to the number of stories ('multilayer building'). The multilayer buildings are generated based on the building polygons bounded by outer polygons ('multiple bounded polygon'). In this paper, we propose a new scheme for creating a complicated shape of 3D building models based on 'multiple bounded polygon'.

キーワード: 自動生成, CG, GIS, 建物境界線, 建物ポリゴン, 3次元建物モデル, 多重建物ポリゴン, 3Dモデル

Keywords: Automatic Generation, CG, GIS, building contour, building polygon, 3D building model, multiple bounded polygon, 3D model

1. はじめに

建物を主要な構成物とする都市の3Dモデル(図-3参照)は、都市計画、まちづくり、景観などのアカデミックな分野から公共事業の情報公開、まちづくりへの住民参加の場、観光案内、企業の広告、営業活動の場としてまで利活用が期待される重要な「情報基盤」である。住民参加型まちづくりでは、現状と整備案の都市の3Dモデルを提示するワークショップ等を開催し、住民、地権者、行政、デザイナーなどの専門家が目標とする街の3Dイメージを共有し、改善案や代替案を検討していくことがよりよいまちづくりにつながる。「現実の街並み」を再現する都市の3Dモデルは、CG(コンピュータグラフィックス)やCV(コンピュータビジョン)、リモートセンシングなどの技術を用いて、現実世界のものの3D形状や色などの情報をコンピュータの世界に取り込んで、仮想空間に構築する。

一方、「将来あるべき街の姿」あるいは「過去の街並み」を再現するには、それぞれ、デザイナーが描く街並みの地図やコンサルタント企業が提出する発掘調査結果、古地図などの地図情報に基づき、主にCGを用い

て、街並みの3Dモデルを製作する。

近年、この都市の3Dモデルは、グーグル社のGoogle Earthの3D表示やリンデンラボ社のセカンドライフで、人々の関心が急速に高まっている。セカンドライフは、現実世界とは異なる世界を構築しているが、Google Earthの3D表示は、現実世界を仮想空間に取り込んで、現実世界を模している。

これらの都市の3Dモデルを作成するためには、3ds MAXやSketchUpなどの3DCGソフトを用い、多くの手作業で作成を行う必要があり、多大な時間と労力を掛けている。例えば、3DモデルをCSG(Constructive Solid Geometry)で作成する場合、次に示す(1)から(5)の労力のかかる手順に従って、モデリングを行っている。(1)屋根や建物本体など建物の部品となる、適切な大きさの直方体、三角柱、多角柱などの基本立体(プリミティブ)を作成する。(2)これらの基本立体の間で、窓やドア用に穴を空ける、または、部品の形状を形成するためのブール演算を行う。(3)作成した部品を回転する。(4)正しい位置にそれらを配置する。(5)それらにテクスチャマッピングを施す。

1: 正会員 工博 岐阜経済大学 教授 情報メディア学科

(〒503-8550 岐阜県大垣市北方町5丁目50番, Tel :0584-77-3511, E-mail : sugihara@gifu-keizai.ac.jp)

2: 非会員 工博 名古屋文理大学 准教授 情報文化学科 (〒492-8520 愛知県稲沢市稲沢町前田 365)

3: 非会員 工修 中京学院大学 中京短期大学部 准教授 (〒509-6192 岐阜県瑞浪市土岐町 2216)



図-1 シンガポールの中心街のオルソ画像

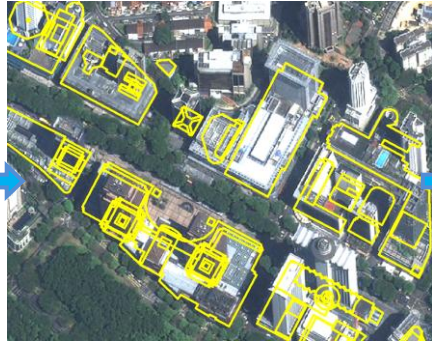


図-2 属性情報を関連付けた多重建物ポリゴンが描いてある電子地図



図-3 本システムで自動生成したシンガポールの街並み

これらの手作業を省力化するために、都市の3Dモデルを、製作ルール（production rules）で自動生成する手続き型モデリング（Procedural modeling）の研究がある^{1) 2)}。この手続き型モデリングでは、L-Systems³⁾やフラクタル等のルールを盛り込んだアルゴリズムを用いて、概形モデルから詳細モデルへと階層的に3Dモデルを作成する。この手法においても、また、別の自動生成手法であるCV^{4) 5)}による3Dモデル構築と同様に、GIS（地理情報システム）が蓄積・管理する電子地図から建物境界線等のデータを取り込んで、都市の3Dモデルを自動生成する研究が多い。しかし、この場合、建物境界線は、建物の1本の外周線のみである。ところが、現実の高層ビルには、図-1のオルソ画像や図-3に示すように建物の高さ方向（グラウンドに対して垂直方向）に、階毎に同じ形状を繰り返す建物だけでなく、高さ方向に、階別に異なる形状となる、複雑な形態の高層ビルも数多く存在する。

本研究では、こうした階別に異なる形態となる建物の3Dモデルを、図-2の電子地図に示すような、階ごとに異なる形状となる「階ごとの境界線」を内部を持つ「多重の建物境界線（建物ポリゴン）」に基づいて、自動生成するシステムを提案する。

また、これらの電子地図上の建物ポリゴンは、下の図-4に示すように、その全ての頂角が直角である直

角ポリゴン（orthogonal polygon）が多い。直角ポリゴンは、適切に分割線を引いて分割することで、長方形の集まりとすることができる。本システムは、図-5に示すように、直角ポリゴンを長方形の集まりに分割して、各長方形の上に建物本体や屋根等の建物を構成する部品を配置し、建物の3Dモデルを自動生成する。図-4と図-5において、建物の階数は建物ポリゴンに関連付けた「階数」などの属性情報に基づいて、自動生成する。

これまでの研究成果^{6) 7)}で、「都市の3Dモデルの自動生成システム」が、電子地図上の頂角が直角の建物境界線（直角ポリゴン）を「長方形の集まり」にまで、分割・分離し、各長方形の上に建物の3Dモデルを自動生成した。本研究では、複数の建物境界線を内包する建物境界線（多重建物ポリゴン）に基づいて、図-1のオルソ画像で示すような、建物の高さ方向に複雑な形状となる建物の3Dモデルを自動生成する手順を提案する。

2. 建物の3Dモデル自動生成のプロセス

(1) 自動生成システムの構成と流れ

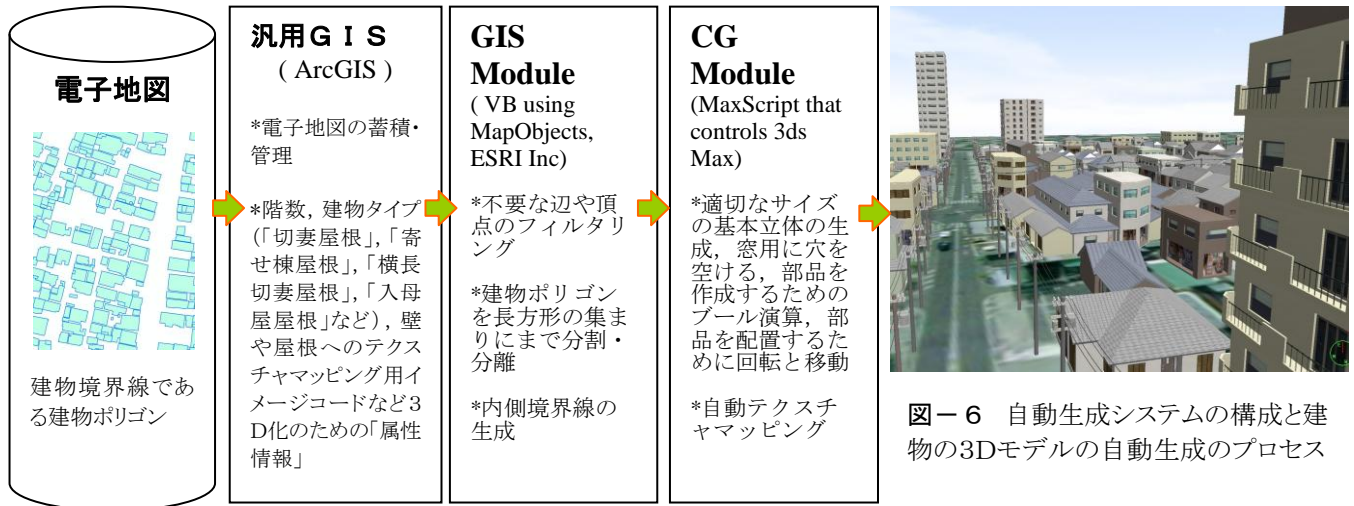
本研究における自動生成のシステム構成と建物の3Dモデルの自動生成のプロセスを図-6に示す。建物



図-4 建物階数など属性情報を関連付けたアメリカの住宅街の電子地図（一部多重建物ポリゴンを含む）



図-5 本システムで自動生成したアメリカの住宅街



の3Dモデルの情報源になるものは、図-6左端に示すような電子地図である。電子地図は、汎用GIS (ArcGIS など)によって、蓄積・管理される。電子地図上の建物ポリゴンは、GISのソフトウェア部品 (MapObjects)を用いてプログラム開発したGISモジュールにて、(1)直角ポリゴンを「長方形の集まり」にまで、分割・分離する。(2)建物ポリゴン上の不要な頂点をフィルタリングする。(3)建物境界線よりセットバックした所にある窓やドアを配置するため内側境界線を生成する、などの「前処理」を行う。

前処理したデータを、3DCGソフト(3ds Max)をコントロールするCGモジュール (MaxScript でプログラム開発)が取込み、以下の処理を自動的にを行い、建物の3Dモデルを自動生成する。

(1)屋根や建物本体、窓など建物の部品となる、適切な大きさの直方体、三角柱、多角柱などの基本立体(プリミティブ)を作成する。(2)これらの基本立体の間で、屋根や窓用に穴を空ける、または、部品を作成するためのブル演算を行う。(3)作成した部品を回転する。(4)正しい位置にそれらを配置する。(5)それらにテキストチャマッピングを施す。

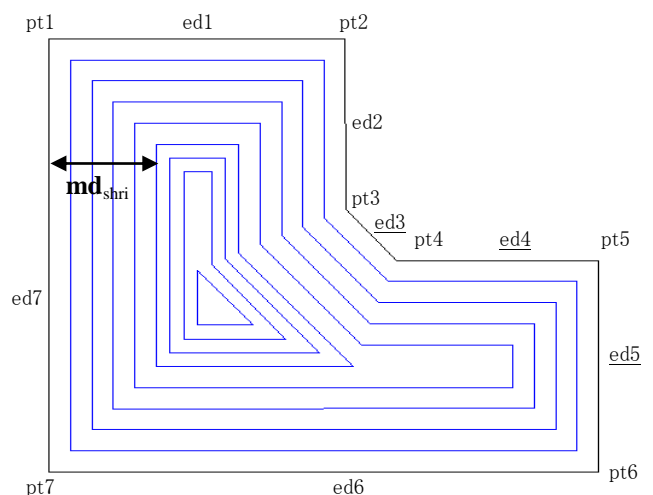
このGISモジュールとCGモジュールでの処理は、本研究で開発したプログラムによって、全て自動的に処理される。例えば、図-5に示すような建物の3Dモデルが約300軒存在する「街の3Dモデル」を自動生成する場合、元になる建物ポリゴンの形状によるが、コンピュータ(CPU:インテル Core2 Duo 2GHz)を用いて、GISモジュールでの、処理時間は約30秒、CGモジュールでの処理時間は、3分から5分の間であった。

(2) Straight Skelton 手法による内側境界線の生成

一般的に、建物の部品である窓やセットバックした1階ファサードは建物の一番外側の境界線である「外周線」から、一定距離セットバックした位置にある。この「一定距離セットバックした境界線」は、ポリゴン

各辺が元の辺と平行となるような仕方で、一定速度でポリゴンの縮小処理を行うことで形成される **Straight Skelton 手法**⁸⁾で生成することができる(図-7参照)。このプロセスにおいて、ポリゴン各辺は、その長さが短くなる辺ばかりでなく、図-7の辺 ed3 に示すように、**Reflex** 頂点(内角が180度以上の頂点)を両端とする辺は長くなる。辺の両端の片方が **Convex** 頂点(内角が180度未満の頂点)である場合は、両端の頂点の内角の和が360度未満であれば、辺は短くなる。縮小するポリゴンの各頂点は、各頂点の頂角を二等分する辺上を移動する。この縮小プロセスは、次のイベントが生じるまで続く。

- (1) **辺消失イベント**: 辺が縮小して消失する。消失辺の両側の辺が、以降は接することになる。
- (2) **分割イベント**: **Reflex** 頂点が辺に交差して、ポリゴンを分割する。分割されて2本になった辺と **Reflex** 頂点に付随する辺が、以降は接するという新たな隣接関係が生じる。



md_{shri} は辺 ed4, ed5 の消失イベントが生じる縮小距離、辺 ed3 は両端が Reflex 頂点で縮小処理で長さが長くなる辺

図-7 Straight Skelton 手法による縮小処理を実行した建物ポリゴン

窓やセットバックファサードの位置出しをするために、建物ポリゴンに対して縮小処理を行うとき、これらのイベントが生じて、辺が消えてしまう可能性があるため、上記イベントが生じる前の縮小処理にすることが必要である。縮小処理を一意に決める、縮小処理前後の各辺の距離を「縮小距離(=d_{shri})」とすると、縮小処理をし始めて、初めて、辺消失イベントが生じる距離は以下の式で与えられる。

$$d_{shri} = L_i / (\cot(0.5 * \theta_i) + \cot(0.5 * \theta_{i+1})) \quad (1)$$

ここで、L_i は辺長、θ_i、θ_{i+1} は辺両端の内角を表す。但し、辺両端の頂点の内角を2等分する線がポリゴン内部で交わるために、0.5*θ_i+0.5*θ_{i+1}<180° となる必要がある。この式を満たす全ての辺について、d_{shri} を上記の式(1)で求める。これらのd_{shri} の中で最小となる値が、最初にイベントを生じる縮小距離となり、その辺が最初に消失する辺となる。図-7では、辺 ed4、ed5 が最初に消失する辺となる。

図-7において、Straight Skelton 手法による縮小ポリゴンは次のアルゴリズムで求めた。

アルゴリズム Shrink Polygon(P, d_{shri})

入力：平面上のn頂点のポリゴンPとd_{shri}。
出力：d_{shri} だけ縮小処理したポリゴン。

- 1) ポリゴンPに対して、時計回りに番号付けする。
- 2) Pのある頂点p_iから1つ前の頂点p_bに向かうベクトルと頂点p_iから次の頂点p_aに向かうベクトルを正規化して、単位ベクトルu_{ib}、u_{ia}とする。
- 3) その2つのベクトルの和(u_{ib}+u_{ia})を求めると、それはその頂点の頂角を二等分するベクトルとなる。
- 4) 縮小ポリゴンを作成するには頂角二等分ベクトル(angular bisector)はポリゴンの内側(辺を時計回り

に追うとき、辺の右側がポリゴン内側となる)を向く必要がある。ポリゴン頂点を時計回りに追うとき、2つのベクトルu_{ib}、u_{ia}の外積を求め、正なら辺は左曲り、負なら辺は右曲りとなる。頂角二等分ベクトルであるベクトルの和(u_{ib}+u_{ia})の符号を以下のように変える。

if u_{ib} と u_{ia} の外積 > 0 // 辺は左曲りか
then 内側頂角二等分ベクトル = -(u_{ib} + u_{ia})
else 内側頂角二等分ベクトル = (u_{ib} + u_{ia})

5) 頂角二等分線に沿って、以下の式(2)で決まる長さ(d_{bisect})だけ頂点から偏位した位置が縮小ポリゴンの頂点位置となる。

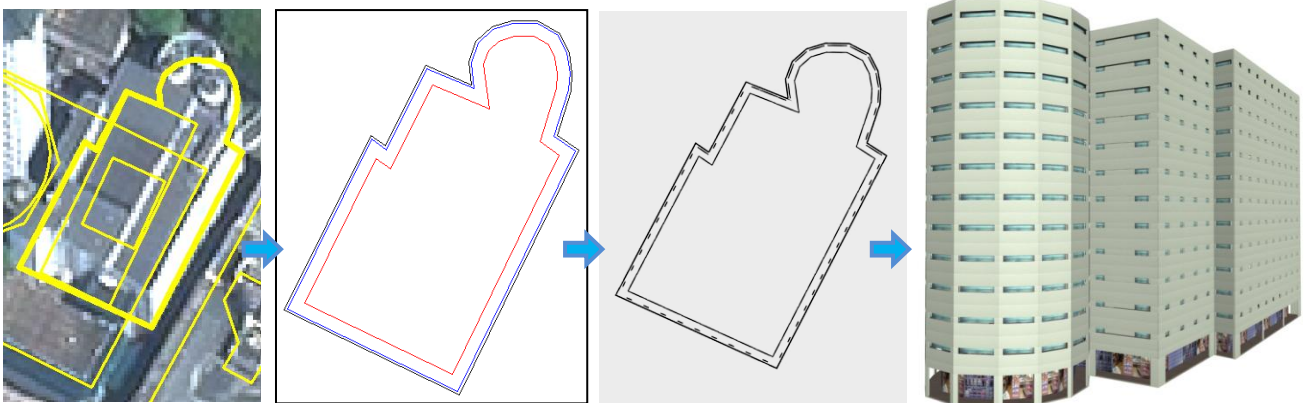
$$d_{bisect} = d_{shri} / \sin(0.5 * \text{angle}(i)) \quad (2)$$

ここで、angle(i)は頂点iの頂角

6) 縮小処理の結果、辺長がほぼゼロになった辺について、消失イベント処理を行い、処理前にその辺に接していた2辺が、イベント以降は接するように、辺や頂点の隣接関係を再構築する。

7) イベント処理の結果、ポリゴンの辺、頂点の隣接関係、トポロジーが変更されたので、辺長や頂角を再計算する。

図-7における縮小処理において、縮小距離がmd_{shri} のとき辺 ed4、ed5 の消失イベントが起こり、辺や頂点の隣接関係が変わる。そのため、縮小ポリゴンの辺長や頂角を再計算し、次に消失イベントを起こす縮小距離を計算する。図-7では、次は辺 ed1、ed2 の消失イベントが起こり、イベント後の縮小ポリゴンは三角形となり、三角形はその内心となり、縮小処理は終了する。Straight Skelton は、この縮小するポリゴンの頂点の軌跡を辿ることで形成される。Straight Skelton 手法は一般的な形状のポリゴンの骨格として、ポリゴンを単調(monotone)ポリゴンに分割できるなど、その応用範囲が広く、計算幾何学の分野だけでなく、パターン



オルソ画像と重ね合わせた非直角建物ポリゴン

ストレートスケルトン手法による内側境界線の生成

内側境界線上に窓やファサード、ドアの配置

非直角建物ポリゴンから自動生成した3Dモデル

図-8 非直角建物ポリゴンから自動生成した3次元建物モデル

認識, CGのProcedural modelingによる建物の屋根の自動モデリング¹⁾など広く応用されている。図-8は, GIS上でオルソ画像に重ね合わせた建物ポリゴンに対して, GISモジュールにて, Straight Skelton手法で複数の内側境界線を生成し, 内側境界線を用いて窓やセットバックしたファサードなどを配置する位置を算出し, それらに基づいて, CGモジュールで自動生成した建物の3Dモデルである。

3. 多重建物ポリゴンからの建物の自動生成

現実の高層ビルには, 図-1のオルソ画像や図-3に示すように建物の高さ方向(グラウンドに対して垂直方向)に, 階毎に同じ形状を繰り返す建物だけでなく, 高さ方向に, 階別に異なる形状をとる, 複雑な形態となる高層ビルも数多く存在する。これら垂直方向に多様な形態をとる建物モデルは, 地図上の山や谷等の起伏を等高線で表すのと同様に, 1つの建物に対して, 形態の異なる階ごとの境界線(建物ポリゴン)を描くことで, これらの建物を表現できると考える。この「形態が異なる階ごとの境界線(多重建物ポリゴン)」の例を図-2に示す。内部に形態の異なる「階ごとの建物ポリゴン」を持つ多重建物ポリゴン, それらを持たない建物ポリゴンの例と, それらから自動生成した建物の3Dモデルを図-9に示す。図-9において, 左は1本の建物ポリゴンから生成された「単純押し出しビル」, 中と右は, 多重建物ポリゴンから生成されたビルで, 複雑な形状の「多層ビル」となる。

多重建物ポリゴンに内包され, 異なる形状となる「階ごとの建物ポリゴン」は, 地図上の等高線のように, その建物ポリゴンの高さは一定で, 交差することがないこととした。ここで, 等高線は, 崖などにおいて, その

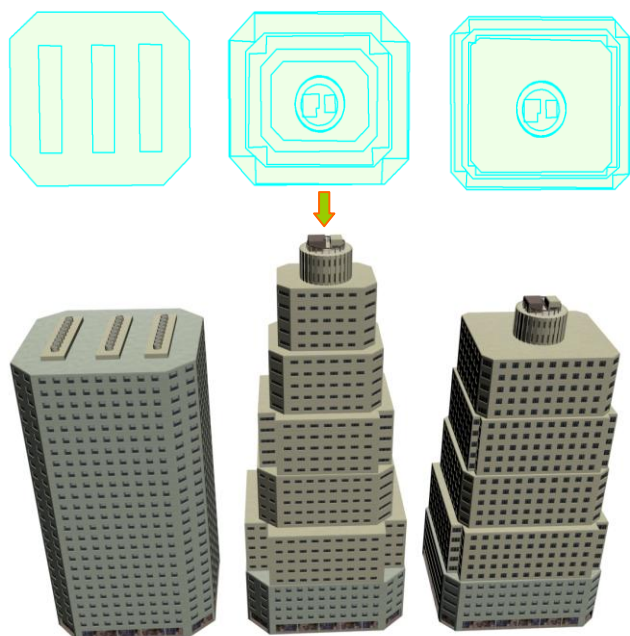


図-9 多重の建物ポリゴンより自動生成された高層ビル(左:単純押し出しビル, 中&右:多層ビル)

傾斜が急になれば等高線の間隔は狭くなり, 垂直になると重なるが, 同じ高さの等高線が交叉することはない。これは, 地形をグラウンドに平行な面で切った場合, 空気と大地を分けるこれらの間の境界線は1本であり, その境界線が交叉したり, 開いた境界線になることはなく, もし交叉している境界線があれば, それらは論理和され, 閉じた境界線となる。ところが, 本研究では, 管理のしやすさのために, GIS上の1層の電子地図を取り扱っているので, 境界線は交叉する可能性がある。もし, 交叉する境界線がある場合は, 含むか含まれるよう修正する必要がある。

多重建物ポリゴンにおいて, 各建物ポリゴンには, ポリゴンから作られる建物部分のその高さだけの高さデータを関連付ける。内包された建物ポリゴンは, どの建物ポリゴンに含まれているかを探索し, 自分を囲む建物ポリゴンの高さデータを取得する。囲む建物ポリゴンが複数の場合は, これらの高さデータの合計を求め, 建物の垂直位置を決定する。図-10にそのアルゴリズムをまとめる。ここで, 「自分を内包する建物ポリゴン」のタイプが建物の「最上部に付ける屋根」であるのであれば, その「屋根」は自分を囲むほど大きいものであっても, 最上部に配置されるので, その高さデータを「自分」の高さデータに加えない。同様に交叉するポリゴンも, 上の階部がはみ出すという不自然なビル形状となるので, そのポリゴンの高さデータを「自分」の高さデータに加えない。

図-11から図-14は, オルソ画像とその上の多重建物ポリゴンを含む電子地図とそれらに基づいて3Dモデルを自動生成した例である。各建物ポリゴンに対して, 建物階数データ, 屋根のタイプ(「切妻屋根」, 「寄せ棟屋根」など)や屋根や壁のイメージコードなどの属性情報を関連付けている。ここで, 1階の形状と2階以上の形状が異なるのは, 高層ビルだけでなく,

- (1) 「内包されている建物ポリゴン(自分)」の頂点のどれか1頂点を取り出し, 電子地図上の他のどの建物ポリゴンに含まれるかを探索する。
- (2) 探索し, 「1頂点を含むポリゴン」あれば, 「自分」の他の全ての頂点が含まれるかどうかを調べ, もし, 全頂点が含まれていない, 即ち, 交叉しているのであれば, そのポリゴンの属性情報である「階数」は高さデータとしてカウントしない。
- (3) 「自分を内包する建物ポリゴン」が見つかった場合, そのポリゴンの属性情報:「建物タイプ」, 「階数」, 「頂点位置」, 「頂点数」などを取得する。但し, もし, そのタイプが建物の「最上部に付ける屋根」であるのであれば, その階数データをカウントしない。
- (4) 「自分を内包する建物ポリゴン」が複数ある場合は, それらの階数データの合計を算出する。ここで, 塔屋などの屋上構造物の場合は1階とする。
- (5) 算出された階数データに基づいて, 「内包されている建物ポリゴン」から生成される3Dモデルの垂直位置を決定する。

図-10 内包されている建物ポリゴンの垂直位置を算出する手順

図-4に示すように、屋根付き建物も、階毎に異なる形状となる建物がある。こうした建物モデルも「多重建物ポリゴン」から自動生成することができる。

4. まとめ

まちづくりや都市計画において、デザイナーやプランナーなどの専門家が、将来の街の姿を考えると、一般的に、地図を描いて、計画案、代替案を検討する。この地図が、素速く街の3Dモデルに変換できれば、プランニングの効率を上げることができる。本システムは、デザイナー等が描き、将来の街の案となる電子地図に基づいて、様々な形態となる建物の3Dモデルを自動的に造り出す機能を持つ。この機能は国内外の既往の研究には見られない。

参考文献

- 1) Müller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A., Luc van Gool, L. V.: Procedural modeling of buildings, ACM Transactions on Graphics 25, 3, 614-623, 2006.
- 2) Parish, Y. I. H., and Müller, P.: Procedural modeling of cities, In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001, ACM Press, E.

- Fiume, Ed., New York, 301-308, 2001.
- 3) Lindenmayer, A.: Mathematical models for cellular interactions in development, Parts I and II. Journal of Theoretical Biology 18, 280-315, 1968.
- 4) Gruen, A. and et al.: Generation and visualization of 3D-city and facility models using CyberCity Modeler. MapAsia 8, 2002.
- 5) Suveg, I. and Vosselman, G.: Automatic 3D Building Reconstruction. Proceedings of SPIE, 4661, 59-69, 2002.
- 6) Kenichi SUGIHARA: Generalized Building Polygon Partitioning for Automatic Generation of 3-D Building Models, ACM SIGGRAPH 2006, Posters Session Virtual & Augmented & Mixed Reality & Environments, 2006.
- 7) 杉原健一, 林良嗣: “様々な形態の屋根付き3次元建物モデルの自動生成”, 土木学会 情報利用技術委員会 2008年度土木情報利用技術論文集 査読付き論文, Vol.17, pp.153-160, 2008.10.
- 8) Aichholzer, Oswin; Aurenhammer, Franz; Alberts, David; Gärtner, Bernd (1995). A novel type of skeleton for polygons, Journal of Universal Computer Science 1 (12): 752-761.

(2010. 5. 27 受付)

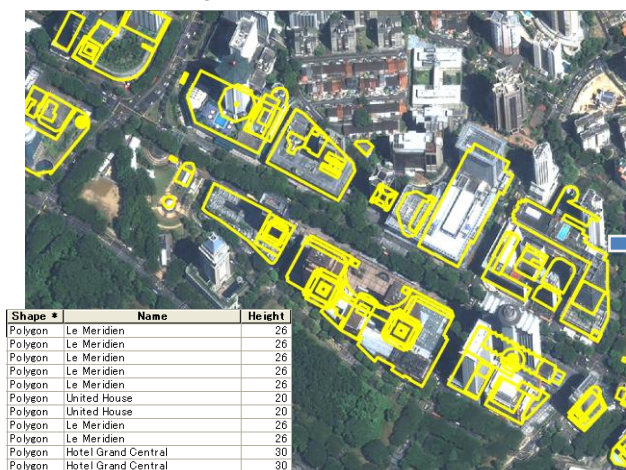


図-1-1 建物階数など属性情報を関連付けたシンガポールの中心街の電子地図

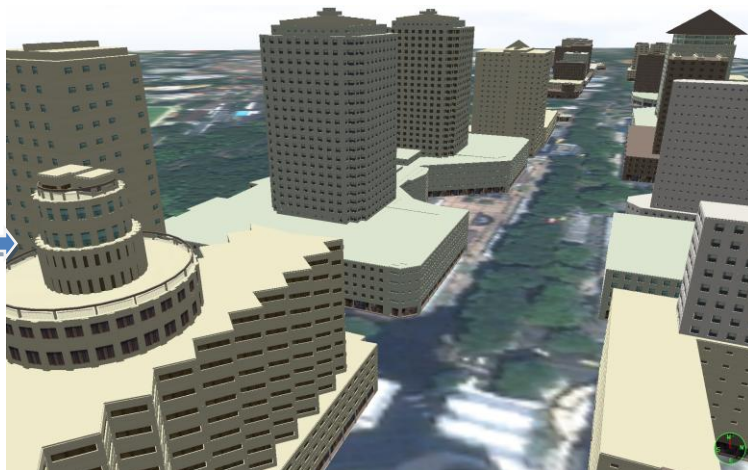


図-1-2 本システムで自動生成したシンガポールの街並みの3Dモデル



図-1-3 建物階数など属性情報を関連付けた豊田市の中心街の電子地図

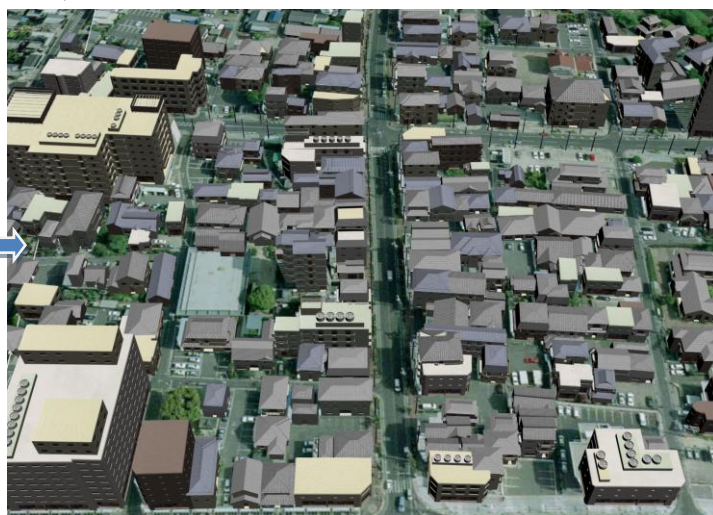


図-1-4 本システムで自動生成した豊田市の中心街